



**Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)**

# Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica

**Atena**  
Editora

Ano 2019

**Henrique Ajuz Holzmann**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)

# **Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica**

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Lorena Prestes e Geraldo Alves

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

I34 Impactos das tecnologias na engenharia mecânica [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica; v. 1)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN 978-85-7247-246-3

DOI 10.22533/at.ed.463190504

1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica – Pesquisa – Brasil. 3. Produtividade industrial. 4. Tecnologia. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Dallamuta, João. III. Série.

CDD 670.427

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos

Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas. Nesta obra é conciliada duas atividades essenciais a um engenheiro mecânico: Projetos e Simulação.

É possível observar que na última década, a área de projetos e simulação vem ganhando amplo destaque, pois através de simulações pode-se otimizar os projetos realizados, reduzindo o tempo de execução, a utilização de materiais e os custos finais.

Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens nos projetos dentro da grande área das engenharias.

Trabalhos envolvendo simulações numéricas, tiveram um grande avanço devido a inserção de novos softwares dedicados a áreas específicas, auxiliando o projetista em suas funções. Sabe-los utilizar de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Neste livro são apresentados vários trabalhos, alguns com resultados práticos, sobre simulações em vários campos da engenharia industrial, elementos de maquinas e projetos de bancadas práticas.

Um compendio de temas e abordagens que constituem a base de conhecimento de profissionais que se dedicam a projetar e fabricar sistemas mecânicos e industriais.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS VIBRATÓRIOS EM DISPOSITIVOS VEICULARES	
<i>Pedro Henrique Barbosa Araujo</i> <i>Evandro Leonardo Silva Teixeira</i> <i>Maria Alzira de Araújo Nunes</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4631905041</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>18</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO PARA REABILITAÇÃO DO JOELHO UTILIZANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	
<i>Lucas Antônio Oliveira Rodrigues</i> <i>Rogério Sales Gonçalves</i> <i>João Carlos Mendes Carvalho</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4631905042</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>29</b>
DESENVOLVIMENTO DE BENEFICIADORA DE FUSO ROTATIVO	
<i>Fábio Gatamorta</i> <i>Danilo Brasil Sampaio</i> <i>Jebson Gouveia Gomes</i> <i>Marco Antônio Pereira Vendrame</i> <i>Gabriel Novelli</i> <i>Atílio Eduardo Reggiani</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4631905043</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>38</b>
MINI EXTRUSORA DIDÁTICA DE POLÍMEROS UTILIZADOS EM IMPRESSORAS 3D	
<i>Marcelo Santos Damas</i> <i>Tiago Zaquia Pereira</i> <i>Ueliton Cleiton Oliveira</i> <i>Sérgio Mateus Brandão</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4631905044</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>53</b>
ANÁLISE PRELIMINAR PARA PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE QUEIMADOR ATMOSFÉRICO PARA FORNO DE FORJAMENTO APLICADO À CUTELARIA	
<i>Luís Fernando Marzola da Cunha</i> <i>Danilo dos Santos Oliveira</i> <i>José Henrique de Oliveira</i> <i>Rhander Viana</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4631905045</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>67</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM MARTELETE ELETROMECAÂNICO DESTINADO AO FORJAMENTO DE FACAS ARTESANAIS	
<i>Cassiano Arruda</i> <i>André Garcia Cunha Filho</i>	

**CAPÍTULO 7 ..... 80**

PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE ESCANEAMENTO 3D A LASER: ESTUDO DE CORES DA SUPERFÍCIE

*Bruno Barbieri*  
*Vinicius Segalla*  
*Marcio Catapan*  
*Maria Lúcia Okimoto*  
*Isabella Sierra*

DOI 10.22533/at.ed.4631905047

**CAPÍTULO 8 ..... 91**

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE FREIOS PARA UM MINI BAJA DA COMPETIÇÃO BAJA SAE BRASIL

*Silas Fernandes Caze*  
*Lucas de Sousa Camelo*  
*Wictor Gomes de Oliveira*  
*Bruno de Oliveira Carvalho*

DOI 10.22533/at.ed.4631905048

**CAPÍTULO 9 ..... 96**

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE AMORTECEDORES TIPO STOCKBRIDGE

*Marcos José Mannala*  
*Marlon Elias Marchi*  
*Marcio Tonetti*

DOI 10.22533/at.ed.4631905049

**CAPÍTULO 10 ..... 103**

MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA DA LÂMINA DE FASE EM CHAVE SECCIONADORA UTILIZANDO SENSOR DE ULTRASSOM

*Carlos Henrique da Silva*  
*Felipe Martins Silva*  
*Fernando Luiz Alhem dos Santos*  
*Jardson da Silva David*  
*Juliana Lopes Cardoso*  
*Milton Zanotti Junior*

DOI 10.22533/at.ed.46319050410

**CAPÍTULO 11 ..... 114**

CÁLCULO DE LINHA DE VIDA UTILIZANDO MÉTODO DE SULOWSKI

*Walter dos Santos Sousa*  
*Caroline Moura da Silva*  
*Érika Cristina de Melo Lopes*  
*Gilton Carlos de Andrade Furtado*  
*Lana Ritiele Lopes da Silva*  
*Michele da Costa Baía*

DOI 10.22533/at.ed.46319050411

<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>127</b>
<b>CÁLCULO DOS TEMPOS DE PENETRAÇÃO E DESVIO DE CALOR DO MODELO X23</b>	
<i>Luís Henrique da Silva Ignacio</i>	
<i>Fernando Costa Malheiros</i>	
<i>Alisson Augusto Azevedo Figueiredo</i>	
<i>Henrique Coelho Fernandes</i>	
<i>Gilmar Guimarães</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050412</b>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>135</b>
<b>TEMPO DE MISTURA EM TANQUES COM IMPULSORES MECÂNICOS EQUIPADOS COM CHICANA PADRÃO E MODIFICADA</b>	
<i>Murilo Antunes Alves Lucindo</i>	
<i>Breno Dantas Santos</i>	
<i>Juliana Sanches da Silva</i>	
<i>Marcos Bruno Santana</i>	
<i>Deovaldo de Moraes Júnior</i>	
<i>Vitor da Silva Rosa</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050413</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>147</b>
<b>A SEGURANÇA DE VOO A PARTIR DA MANUTENÇÃO E OS RISCOS GERADOS PELOS FATORES HUMANOS</b>	
<i>Daniel Alves Ferreira Lemes</i>	
<i>Kennedy Carlos Tolentino Trindade</i>	
<i>Anna Paula Bechepeche</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050414</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>169</b>
<b>VANTAGENS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA UNIDADES DE ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO</b>	
<i>Luriane Pamplona dos Santos Barbosa</i>	
<i>Rodrigo de Cássio Vieira da Silva</i>	
<i>Thiago Eymar da Silva Oliveira</i>	
<i>Arielly Assunção Pereira</i>	
<i>Roger Barros da Cruz</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050415</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>185</b>
<b>MEDIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE EM ÓLEO LUBRIFICANTE DE TURBINAS</b>	
<i>Isabella Fenner Rondon</i>	
<i>Josivaldo Godoy da Silva</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050416</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>196</b>
<b>ESTUDO SOBRE GESTÃO DE LUBRIFICAÇÃO PARA ALTO DESEMPENHO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS</b>	
<i>Fernanda do Carmo Silvério Vanzo</i>	
<i>Vicente Severino Neto</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050417</b>	

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>209</b>
APLICAÇÃO DE TÉCNICA PARA AUMENTO DO TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS EM VENTILADORES INDUSTRIAIS	
<i>Fernanda do Carmo Silvério Vanzo</i>	
<i>Edmar Antônio Onofre</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050418</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>221</b>
ANÁLISE E CORREÇÃO DE FALHAS EM UM EIXO DO MONTANTE	
<i>José Airton Neiva Alves da Silva Brasil</i>	
<i>Victor Gabriel Pereira Valverde</i>	
<i>Luís Felipe Furtado Pontes</i>	
<i>Guilherme Guimarães Sousa e Silva</i>	
<i>Lucas Silva Soares</i>	
<i>Marcos Erike Silva Santos</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050419</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>236</b>
ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE FALHAS DE UM ROTOR DINÂMICO UTILIZANDO SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL	
<i>Estevão Fuzaro de Almeida</i>	
<i>Luiz Gustavo Pereira Roéfero</i>	
<i>Fábio Roberto Chavarette</i>	
<i>Roberto Outa</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050420</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>245</b>
DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA BAJA SAE E DO GERENCIAMENTO DA EQUIPE NO CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFANOR	
<i>Wictor Gomes De Oliveira</i>	
<i>João Paulo Correia Teixeira</i>	
<i>Vitor Fernandes Mendes Martins</i>	
<i>Tulio Rosine Martins De Souza</i>	
<i>Bruno De Oliveira Carvalho</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.46319050421</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>247</b>

## ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE FALHAS DE UM ROTOR DINÂMICO UTILIZANDO SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL

### **Estevão Fuzaro de Almeida**

UNESP – Univ. Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira  
Ilha Solteira/SP.

### **Luiz Gustavo Pereira Roéfero**

UNESP – Univ. Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira  
Ilha Solteira/SP.

### **Fábio Roberto Chavarette**

UNESP – Univ. Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira  
Ilha Solteira/SP.

### **Roberto Outa**

Fatec Araçatuba - Faculdade de Tecnologia de Araçatuba  
Araçatuba/SP.

UNESP – Univ. Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira  
Ilha Solteira/SP.

**RESUMO:** O conceito de Monitoramento da Integridade Estrutural (do inglês, *Structural Health Monitoring* – SHM) é baseado em um mecanismo de detecção de falhas utilizado nas indústrias, e em outras aplicações, que envolve a observação de uma estrutura ou de um sistema mecânico. Esta observação ocorre através da resposta dinâmica de medições periódicas, posteriormente relacionadas a análise estatística, determinando a integridade do

sistema. Diante disso, esse projeto de pesquisa propõe a análise de comportamento de falhas relacionadas ao desbalanceamento de um rotor dinâmico utilizando a teoria de Sistemas Imunológicos Artificiais com base no Algoritmo de Seleção Negativa. Tomou-se a situação normal/ótima de operação do rotor e, fazendo a frequência variar de 4Hz a 48Hz, com passo de 2Hz, gerou-se um banco de dados (*baselines*) de sinais que recebem a denominação de Sinais Próprios. A partir da introdução de falhas (massas desbalanceadoras), captaram-se novos sinais denominados de Sinais Não-Próprios. Esses são comparados com os Sinais Próprios a fim de se verificar a afinidade entre os sinais utilizando um desvio-padrão de 3% e assim classificá-los como falha ou não-falha. A ideia futura é gerar um banco de dados completo, isto é, que seja capaz de classificar e diagnosticar o tipo de falha no sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monitoramento da Integridade Estrutural, Sistema Imunológico Artificial, Detecção de Falhas

**ABSTRACT:** The Structural Health Monitoring (SHM) concept is based on a fault detection mechanism used in industries and other applications that involves the observation of a structure or a mechanical system. This observation occurs through the dynamic response of periodic measurements, later

related to statistical analysis, determining the integrity of the system. Therefore, this research project proposes the analysis of failure behavior related to the imbalance of a dynamic rotor using the theory of Artificial Immunological Systems based on the Negative Selection Algorithm. The normal/optimum operating conditions of the rotor were taken and, by varying the frequency from 4Hz to 48Hz, with a 2Hz step, a database of signals (baselines) was generated receiving the designation of Own-Signals. From the introduction of faults (unbalancing masses), new signals called Non-Own Signals were captured. These are compared with the Own-Signals in order to verify the affinity between the signals using a standard deviation of 3% and thus classify them as failure or non-failure. The future idea is to generate a complete database, that is, to be able to classify and diagnose the type of system failure.

**KEYWORDS:** Structural Health Monitoring, Artificial Immune System, Fault Detection

## 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente o nosso sistema de vida está relacionado em diferentes conceitos, a maioria, ligados a máquinas e equipamentos, cuja finalidade é prover o conforto e o bem-estar humano. As industriais produzem peças de equipamentos com níveis aceitáveis de qualidade e é por isso que se deve pensar no conceito e confiabilidade em projetos de máquinas e na manutenção. A predição de detecção de falhas é um dos principais fatores que reduzem os custos de produção, pois é possível analisar o estado da peça e prever a parada na linha de produção.

O chamado Monitoramento da Integridade Estrutural (do inglês, *Structural Health Monitoring* – SHM) é uma área de conhecimento que surgiu com o intuito de detectar falhas estruturais em estados iniciais a fim de se evitar acidentes catastróficos que podem levar a perdas materiais e de vidas humanas. Diante do avanço da Engenharia e da necessidade da construção de componentes seguros, a teoria de SHM tem sido desenvolvida e aprimorada ao longo das décadas (Lima, 2014). Falhas não são interessantes devido a variação extremamente sensível que provocam nos parâmetros espaciais da estrutura. Isso pode ocasionar uma redução da rigidez estrutural, uma redução da massa e também pode aumentar o amortecimento, modificando totalmente o comportamento dinâmico da estrutura (Turra *et al.*, 2013).

O princípio básico de funcionamento do SHM envolve a análise e a observação de um sistema estrutural no decorrer do tempo. Essas observações podem ser realizadas através de medições dinâmicas utilizando sensores, geralmente utilizam-se transdutores que recebem o sinal e o transportam para um conversor analógico-digital e que posteriormente é interpretado por algum sistema digital como um computador auxiliado por *software* especializado e relacionado a análise estatística, determinando a integridade estrutural do sistema (Farrar & Worden, 2013).

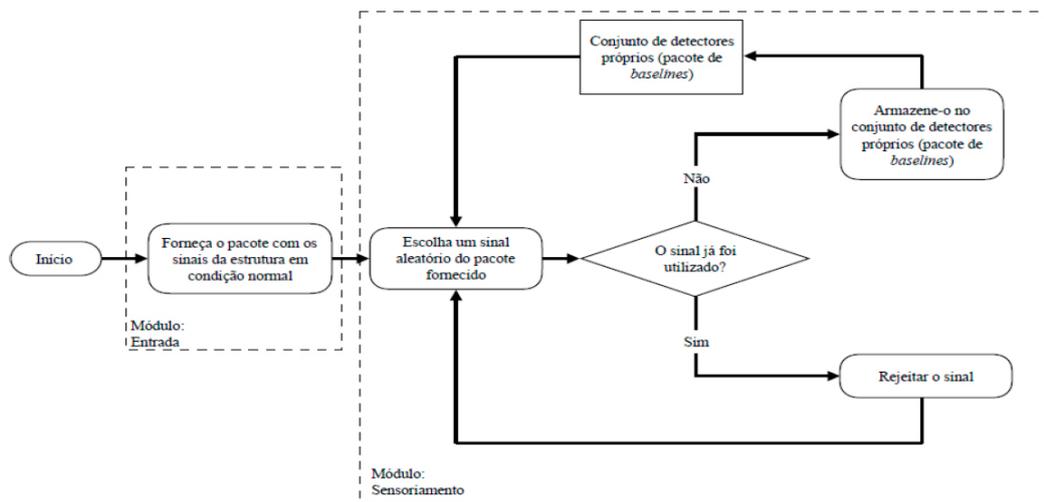
A grande vantagem dos Sistemas Imunológicos Artificiais, em comparação às Redes Neurais, por exemplo, é o fato de que eles proporcionam estabilidade

e plasticidade. A estabilidade é a capacidade de o sistema aprender através da experiência, já a plasticidade é definida como a capacidade de continuar o aprendizado com a inclusão de novos padrões, mas sem perder o que fora previamente aprendido em conhecimentos prévios. Já nas Redes Neurais, a inclusão de um novo padrão requer a reinicialização do processo, acabando com tudo o que já era de conhecimento do sistema.

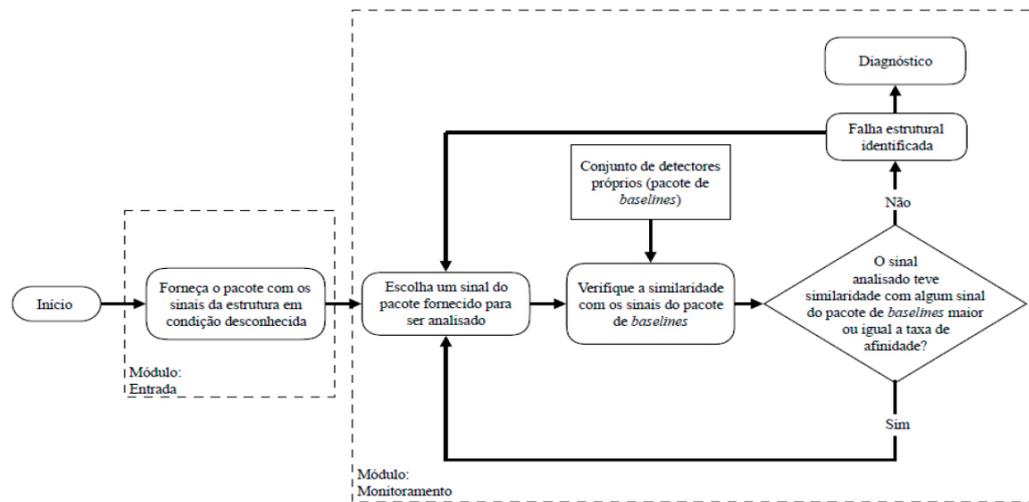
Um sistema SHM recebe classificação em 4 níveis, sendo: detecção do dano; detecção e localização do dano; detecção, localização e avaliação do dano; detecção, localização, avaliação do dano e predição da vida útil da estrutura (Doebbling *et al*, 1998). Existem técnicas variadas de pós-processamento utilizadas em SHM. Uma delas, e que será utilizada nesse projeto de pesquisa, é o chamado Algoritmo de Seleção Negativa (ASN). Esse algoritmo recebe esse nome por ser inspirado na seleção negativa dos linfócitos T que ocorre no timo (glândula linfoide primária, responsável pelo desenvolvimento e seleção de linfócitos T) e que é responsável por discriminar células próprias e não-próprias no organismo. Esse algoritmo é executado em duas fases: *sensoriamento* e *monitoramento* (De Castro, 2001).

Na fase de sensoriamento é determinado um conjunto-base (*baselines*) de detectores do sistema. Concluída essa etapa, parte-se para a fase de monitoramento que é responsável pela análise de sinais em condição desconhecida e a comparação desses sinais com o pacote de *baselines*.

As Figuras 1 e 2 representam os fluxogramas de sensoriamento e monitoramento, respectivamente.



**Figura 1.** Fluxograma da fase de sensoriamento do Algoritmo de Seleção Negativa (ASN) (Lopes *et al*, 2018)



**Figura 2.** Fluxograma da fase de monitoramento do Algoritmo de Seleção Negativa (ASN) (Lopes *et al*, 2018)

Diante do exposto até então, objetiva-se, através desse projeto de pesquisa, estudar a detecção de falha baseada no desbalanceamento do eixo de um rotor dinâmico utilizando um acelerômetro de 3 eixos MMA8452Q com *software* implementado em *Arduino*.

## 2 | METODOLOGIA

A metodologia e os materiais empregados nesse projeto de pesquisa podem ser divididos em 3 partes: elétrica, mecânica e *software* computacional.

A parte elétrica consiste em um *Arduino UNO* com um acelerômetro *MMA8452Q* de três eixos conectado a um computador com um *software* da mesma empresa. A parte mecânica é composta por motor, inversor de frequência, mancais, eixo e massas desbalanceadoras de 50g que são introduzidas ao sistema por meio de um disco raiado. Já a parte computacional utiliza do *software* da própria *Arduino* para programar a coleta de dados captados pelo acelerômetro de 3 eixos e gerar um banco de dados com base na variação de frequência de rotação do motor.

A Figura 3 a seguir apresenta o equipamento utilizado para a captação dos dados. Na primeira parte (a) pode-se observar o motor, o inversor de frequência, o eixo acoplado aos mancais, o disco raiado no qual serão inseridas as massas de 50g, e o sistema elétrico composto por acelerômetro, *Arduino UNO* e *protoboard*. Na segunda parte (b) pode-se observar em maiores detalhes a posição em que fora colocado o acelerômetro para captação dos sinais. E na última parte (c) pode-se observar a parte elétrica em maiores detalhes, sendo composta basicamente por um circuito resistivo.

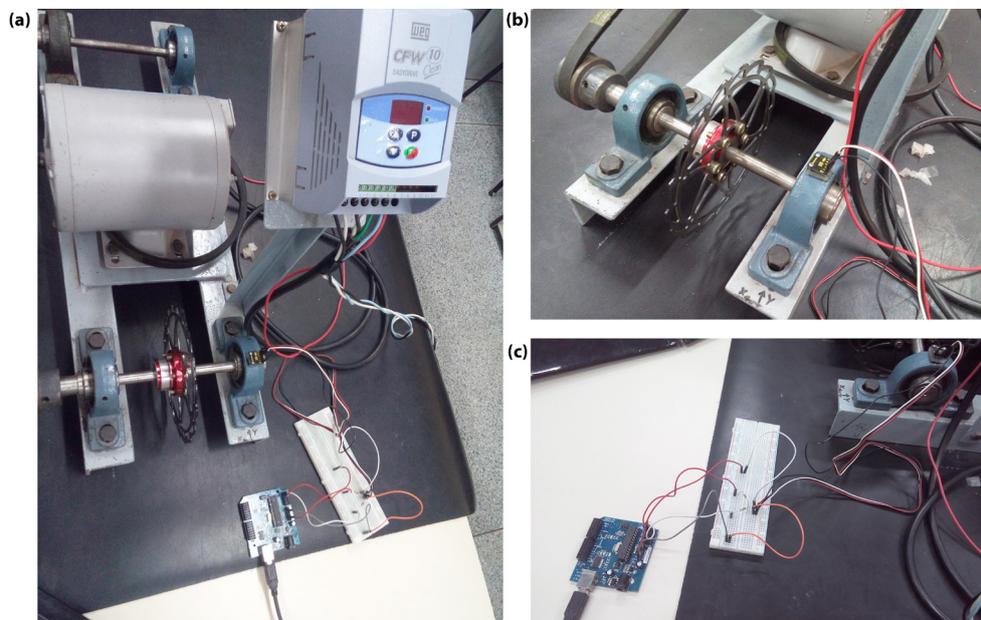


Figura 3. Aparato experimental utilizado na detecção de falha por SHM

## 2.1 Procedimento experimental

Primeiramente é realizada a montagem do experimento, tomando-se o devido cuidado com a posição dos fios de modo a não ocorrerem acidentes, principalmente por estar sendo utilizada uma máquina rotativa. Montado o experimento conforme a Fig. (3), e plugando-se o *Arduino* à entrada USB de um computador, pode-se enviar e carregar o programa referente ao acelerômetro de três eixos *MMA8452Q*. A partir do momento em que o programa é carregado, o acelerômetro já está pronto para captar os dados espaciais de aceleração.

Escolheu-se o posicionamento do acelerômetro sobre um dos mancais pois sabia-se que os sinais ali captados seriam corretos dado que os mancais são recém-adquiridos, isto é, não haveria interferência alguma na captação de sinais.

A primeira coleta de dados foi necessária para se gerar a *baselines* do ASN: fazendo o motor variar sua rotação entre 4Hz e 48Hz, com passo de 2Hz, captaram-se duas amostras de sinais com 399 elementos para cada passo, obtendo-se 46 sinais que recebem o nome de Sinais Normais.

A segunda coleta de dados foi feita adicionando-se uma falha ao sistema (massa desbalanceadora de 50g posicionada no disco raiado centrado no eixo): fazendo-se o motor varia sua rotação entre 4Hz e 14Hz, com passo de 2Hz, captaram-se dez amostras de sinais com 399 elementos para cada passo, obtendo-se 60 sinais que recebem o nome de Sinais Não-Próprios I, referentes a uma massa desbalanceadora.

E a terceira coleta de dados foi feita adicionando-se uma segunda massa no disco raiado de modo com que as massas fiquem com uma angulação de  $120^\circ$  entre si: fazendo-se o motor varia sua rotação entre 4Hz e 14Hz, com passo de 2Hz, captaram-se dez amostras de sinais com 399 elementos para cada passo, obtendo-se 60 sinais que recebem o nome de Sinais Não-Próprios II, referentes a duas massas

desbalanceadoras.

Para cada conjunto de sinais referentes a um passo de 2Hz, têm-se acelerações nos eixos x, y e z. Porém, é necessário se trabalhar com uma grandeza de aceleração geral e aplicar a Transformada de Fourier sobre ela, de modo a compactar o sinal passando-o para o domínio da frequência. Sendo assim, na montagem das matrizes que formarão as *baselines*, realizou-se uma operação algébrica tomando-se a raiz quadrada da soma dos quadrados das acelerações nos eixos e em seguida aplicou-se a Transformada de Fourier sobre esse sinal, reservando sua parte real (magnitude). Esse sinal obtido que será guardado e utilizado nas *baselines* para cada conjunto referente à cada frequência de rotação do motor.

Com o pacote de *baselines* gerado pelos Sinais Normais e com os Sinais Não-Próprios I e II, podem-se realizar testes com o ASN de modo a verificar se seu funcionamento está de acordo com o esperado e se os sinais foram bem coletados.

Esse teste é realizado por *software* e consiste na aplicação dos Fluxogramas apresentados nas Fig. (1) e Fig.(2). Primeiramente são carregados os Sinais Normais (definidos como Sinais Próprios pelo ASN) que receberão proteção e monitoramento pelo algoritmo. Posteriormente são carregados os Sinais Não-Próprios I, referentes a uma massa desbalanceadora. A partir daí, o ASN avalia a similaridade entre os Sinais Não-Próprios I e os Sinais Normais: caso a similaridade seja superior a um determinado limiar (definido ao se fazer uma divisão entre o número de cadeias próprias e o número total de cadeias, englobando cadeias próprias e não-próprias), isso indica que houve um reconhecimento do conjunto próprio (*baselines*), e esse sinal deve ser rejeitado. Caso a similaridade seja inferior a esse limiar, esse sinal é classificado como falha estrutural, gerando um diagnóstico.

Para os Sinais Não-Próprios II, referentes as duas massas desbalanceadoras a 120° de angulação, o procedimento empregado fora o mesmo.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes foram realizados usando uma cadeia de Sinais Normais na ordem de 46 sinais, captados sobre um *range* de frequências de vibrações de 4Hz até 48Hz com passo de 2Hz. Foram utilizados 60 Sinais Não-Próprios captados sobre um *range* de captação de 4Hz até 14Hz também com passo de 2Hz, entretanto foi adicionada uma massa desbalanceadora ao sistema.

Variaram-se o número de sinais próprios utilizados nas simulações visando analisar qual a porcentagem de acerto do algoritmo ao se variar a *baseline* do sistema

O Algoritmo de Seleção negativa realizou uma análise ponto a ponto na onda após a aplicação da Transformada de Fourier, pois é bem mais fácil realizar a diferenciação entre ondas quando elas se encontram no domínio da frequência, sendo possível detectar os picos de ressonância do sistema.

Os resultados estão mostrados na Tab. 1 e correspondem à consideração de um desvio padrão entre os sinais de 3%.

Testes	Número Total de Sinais	Sinais Próprios	Sinais Não-Próprios	Taxa de Afinidade	Porcentagem de acerto
1°	106	46	60	43.3962%	100%
2°	100	40	60	40.0000%	100%
3°	90	30	60	33.3333%	100%
4°	80	20	60	25.0000%	100%
5°	70	10	60	14.2857%	100%

**Tabela 1.** Testes de detecção para uma massa desbalanceadora

Foi então adicionada uma segunda massa ao eixo do rotor de modo a promover um desbalanceamento diferente do primeiro caso. A segunda massa formava 120° de angulação com relação a primeira e variou-se a *baseline* do sistema de acordo com o mesmo critério definido na primeira parte do experimento. Os resultados são encontrados na Tab. 2 e, assim como na primeira parte do experimento, considerou-se um desvio padrão de 3% entre os sinais.

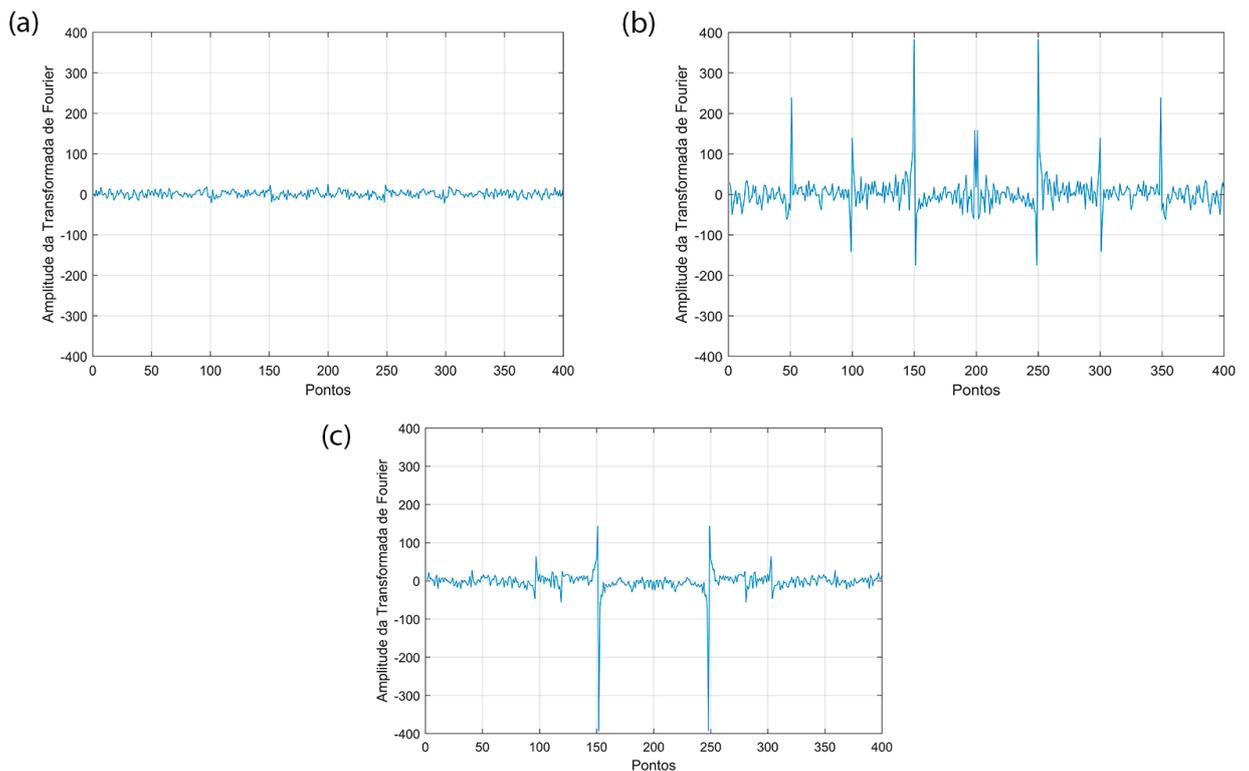
Testes	Número Total de Sinais	Sinais Próprios	Sinais Não-Próprios	Taxa de Afinidade	Porcentagem de acerto
1°	106	46	60	43.3962%	100%
2°	100	35	60	36.8421%	100%
3°	90	25	60	29.4118%	100%
4°	80	15	60	20.0000%	100%
5°	70	5	60	7.6923%	100%

**Tabela 2.** Testes de detecção para duas massas desbalanceadoras a 120°

Podemos perceber que em todos os testes de ambas as partes do experimento, o Algoritmo de Seleção Negativa apresentou 100% de acerto na detecção das falhas. Este resultado demonstra a efetividade e a robustez do método de análise empregado, tornando-o completamente apto para desempenhar tal função no ramo industrial ou aeronáutico.

Para avaliar o motivo do acerto perfeito do software, julgou-se interessante a análise dos gráficos da Transformada de Fourier do sinal com frequência de 14Hz para todas as condições impostas. A frequência de análise foi escolhida aleatoriamente e os gráficos encontram-se mostrados na Fig. (4).

Podemos evidenciar que tanto o sinal coletado com apenas uma massa desbalanceadora (b), quanto o sinal coletado com duas massas desbalanceadoras (c) do sistema diferem acentuadamente do Sinal Normal (Próprio) (a), sendo que os primeiros apresentam picos de amplitude bastante notórios. Devido a este fato, o algoritmo conseguiu identificar com facilidade a natureza dos Sinais Não-Próprios referentes às massas desbalanceadoras utilizadas nos testes.



**Figura 4.** Transformada de Fourier (a) Sinal Normal (b) Sinal Não-Próprio com 1 massa (c) Sinal Não-Próprio com 2 massas

## 4 | CONCLUSÃO

Conclui-se com base nos resultados que a coleta de sinais com um dispositivo relativamente barato (*Arduino*) foi bem fundamentada e realizada no que diz respeito às teorias de Monitoramento da Integridade Estrutural e Sistemas Imunológicos Artificiais pelo Algoritmo de Seleção Negativa. A análise da saúde das máquinas é de suma importância para a predição e prevenção de falhas estruturais que podem ocasionar acidentes e até mesmo catástrofes. Visando melhorar o trabalho, pretende-se fazer com que o ASN além de classificar um sinal como falha ou não-falha, possa identificar o motivo da falha através de um diagnóstico: a ideia é trabalhar com um pacote vasto que abranja tanto sinais próprios, em condições normais de funcionamento, quanto sinais de falha que possam abranger diversas situações (massas desbalanceadores, mancais em mau funcionamento, eixo trincado, etc). Dessa forma, o ASN poderá dar um diagnóstico completo sobre a saúde de um sistema com base na análise dos componentes que o formam.

## 5 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório SISPLEXOS, onde fora desenvolvido o projeto, bem como à UNESP pelo suporte técnico e acadêmico.

## 6 | AUTORIZAÇÕES/RECONHECIMENTO

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(veis) pelo material impresso contido neste artigo.

### REFERÊNCIAS

De CASTRO, L. N. **Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicas artificiais**. 2001.

DOEBLING, S.W., FARRAR, C. AND PRIME, M., 1998. **A summary review of vibration-based damage identification methods**. Vol. 30, pp. 91–105.

FARRAR, C.R.; WORDEN, K.; **Structural Health Monitoring: A machine Learning Perspective**, 1<sup>o</sup> ed., John Wiley & Sons, United Kingdom, 2013. 643p.

LIMA, F.P.A., CHAVARETTE, F.R., SOUZA, S.S.F. AND M., L.M.L., 2017. Monitoring and Fault Identification in Aeronautical Structures Using an Wavelet-Artificial Immune System Algorithm, **Springer International Publishing**, Cham, pp. 203–219. ISBN 978-3-319-55852-3.

LOPES, K.; CHAVARETTE, F. R.; BUENO, C. G. G. ; LOPES, M. L. M. . Monitoramento da Integridade Estrutural utilizando Sistemas Imunológicos Artificiais. **In: X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Salvador, Bahia, 2018.

TURRA, A. E.; BAPTISTA, F. G.; LOPES JUNIOR, V.; VIEIRA, J. Detecção de dano em placas de alumínio utilizando impedância Eletromecânica. **In: Simpósio Brasileiro De Automação Inteligente-SBAI**, 11., 2013, Fortaleza. Anais ... Fortaleza: SBMAC/SBA, 2013. p. 1-6.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Henrique Ajuz Holzmann** - Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**João Dallamuta** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro de Telecomunicações pela UFPR. Especialista em Inteligência de Mercado pela FAE Business School. Mestre em Engenharia pela UEL. Trabalha com os temas: Inteligência de Mercado, Sistemas Eletrônicos e Gestão Institucional.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-246-3

